

積雪寒冷地河川における水理的多様性の持続的維持を可能にする河道設計技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、永多朋紀、赤堀良介

【要旨】

札内川では、治水上の要請から、河道安定化策として流路を河道の中心方向へと誘導するための水制工が数多く設置されてきた。近年、流路の固定化と河道内植生の樹林化が進行し、札内川の特徴であった礫河原が急速に消失しつつある。流路の固定化は河道内の流況を単調化し、水生生物の生息環境を悪化させる可能性があるほか、河道内植生の樹林化は洪水期の水位上昇を招くため、治水・環境両面から早急な対策が求められている。本研究では、水生生物の生息状況及びその生態的特性を把握するため、札内川中流域を対象に生物量と物理量に関する詳細な現地調査を行った。また、調査結果をもとにした選好度解析を行い、空間的な特性を含まない無次元量を用いた指標を作成した。さらに、この指標を PHABSIM の手法を用いた生態系評価モデルへと適用し、ダム放流が河川環境に与える影響を、水生生物の生息環境の面から定量的に評価することを試みた。

キーワード：札内川、ダム放流、河川生態系評価モデル

1. はじめに

札内川は、河道内に広がった礫河原の上に複列状の流路が形成されている（図-1）。このような河道では、出水毎に流路の移動と河床の更新が繰り返されるため、治水上の要請から、河道安定化策として、流路を河道の中心方向へと誘導するための水制工が数多く設置されてきた。しかし近年、流路が固定化された河道内では、流路の単列化や河道内植生の樹林化が目立つようになり、これらの現象と呼応するように札内川の特徴であった礫河原が急速に消失しつつある。

このような背景のもと、2012年6月、札内川では礫河原の再生を目的とした融雪出水規模のダム放流が試験的に実施された。これは、ダムの放流量を制御することで人為的な出水を生起させ、河床の攪乱と植生の更新を促すことを目指した新たな試みである。事後調査から、樹林化をもたらすヤナギ種子の定着に対しては一定の抑制効果があることが確認されている。一方、水生生物の生息環境へ与える影響に関しては未だ十分な知見が無く、今後河川環境の改善効果を量る上では、これを定量的に評価していく必要がある。

河川生態系を評価する手法としては、PHABSIM が一般的によく用いられるが、指標となる選好曲線は、水深・流速等の局所的な物理量との相関関係から直接指標化される場合が多く、限られた地点の調



図-1 昭和 53 年の河道状況（KP0/34～0/37）

査データでは評価できる流れ場が限定され、広範囲且つ空間的に連続した評価が困難であった。また、同一河川でも上下流域では流れ場の特性が異なるため、流域全体への適用を図る上では、より汎用性の高い指標が求められる。

本研究では、水生生物の生息状況及びその生態的特性を把握するため、札内川中流域を対象に生物量と物理量に関する詳細な現地調査を行った。また、この調査結果をもとにした選好度解析を行い、空間的な特性を含まない無次元量を用いた指標を作成した。さらに、この指標を PHABSIM の手法を用いた生態系評価モデルへと適用し、当該ダム放流が河川環境に与えた影響を、水生生物の生息環境の面から定量的に評価することを試みた。

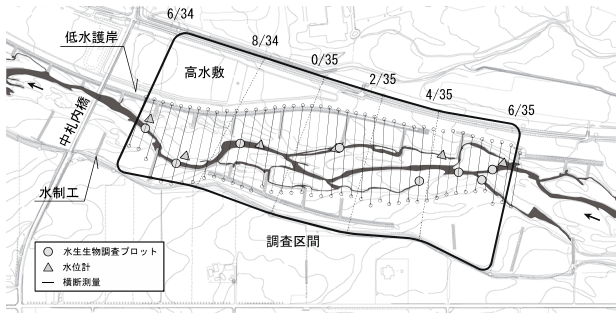


図-2 調査区間（札内川中流 KP34.6～35.6）

2. 現地調査

河川環境を生物面から評価するためには、生物量と物理量とを結びつける適切な指標の選定とその精度が重要となる。本研究では、札内川中流域を対象とした現地調査を行い、その結果をもとに生物量と物理量の相関・回帰分析を行い、水生生物の生息環境を評価し得る有効な物理指標について検討を行う。

2.1 調査箇所・時期

現地調査箇所は、近年、水制工・低水護岸・高水敷の設置等により、流域内でも特に河川環境が大きく変化している札内川中流 KP34.6～35.6 の1km 区間を選定した。調査区間の概要を図-2 に示す。

水生生物は、種によって季節・生活史に応じた生息適地を持つものと考えられ、調査箇所によっては捕獲数に大きな差異が生じることも想定される。

よって、調査箇所の選定にあたっては、目視により判断された瀬淵等の主要な河川構造（ハビタット）のほか、細流・止水域などの特殊な環境も含め、河道内に存在する様々な水理条件を有する箇所を複数選定した。

水生生物の生息状況の季節的な変化を捉えるため、調査時期は各季節を網羅するよう春期・夏期・秋期・冬期の計4回実施した。各調査の時期及び箇所数は下表の通りである。なお、本調査はいずれも低水～平水流量規模（上札内観測所 KP41.8：Q=5～20 m³/s 程度）で実施されたものである。

表-1 調査時期・箇所数

	春期	夏期	秋期	冬期	
時期	H24.6	H24.8	H23.11	H24.12	4
箇所数	11	11	15	11	48

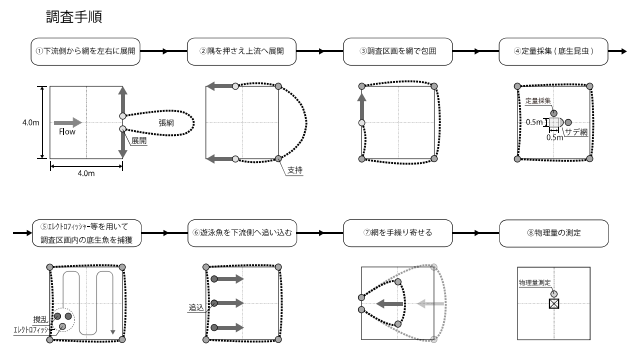


図-3 調査手法・手順

2.2 調査手法

生物調査は、調査の時期や箇所が異なるデータを定量的に比較できるように、捕獲方法及び作業強度は可能な限り統一して行うものとし、コードラド法（区画法）により、一定区画内の魚類及び底生生物の捕獲採集を行った。

魚類に関しては、一区画あたりの作業強度を3人30分と定め、4m四方の調査プロット内を張網で包囲した後、エレクトロフィッシャーやサデ網等を用いて捕獲採集を行った。なお、札内川は礫床河川であるため、礫間に潜む底生魚も隈無く捕獲できるよう、調査時は手足を用いて河床面の攪乱を行っている。

物理環境については、横断測量による河道断面形状の計測と各調査プロット内における水深、流速、水温、河床材料の粒径のほか、調査区間内に計6箇所の自記水位計を設置し、水位の自動観測を行った。

魚類、底生生物および物理環境の測定を含めた一区画あたりの作業手順を図-3 に示す。

2.3 調査箇所の物理環境

秋期調査時に確認された代表的なハビタット区分の物理環境を以下に要約する。

早瀬は表面流速が高く、河床面には粗粒化の傾向が強く見られ、礫表面には藻類の付着がほとんど見られない。平瀬の流速は0.5m/s程度で、底質はやや

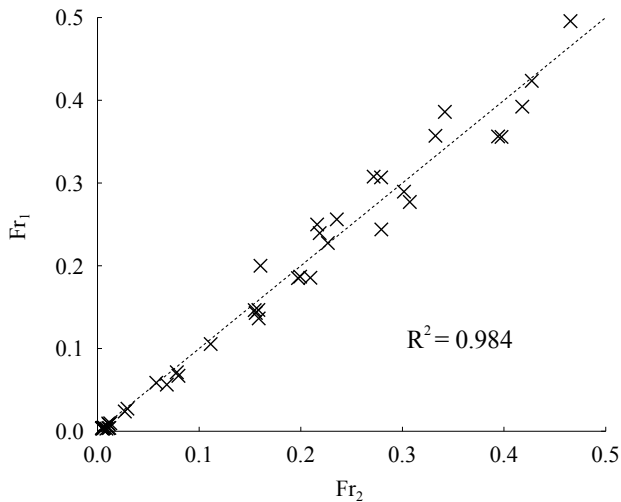


図-4 Fr の適合状況

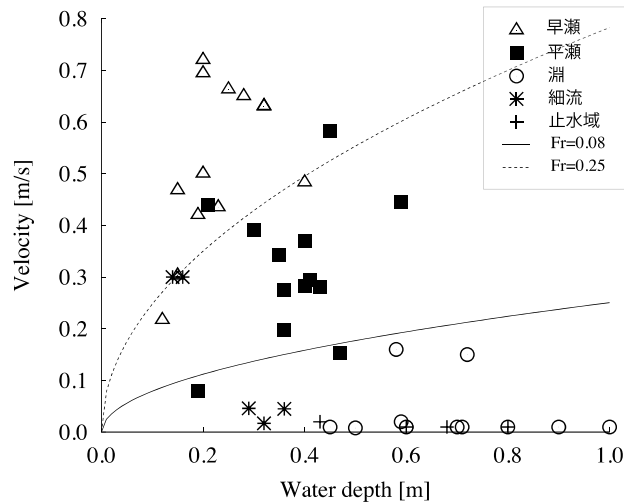


図-6 調査プロットのハビタット区分

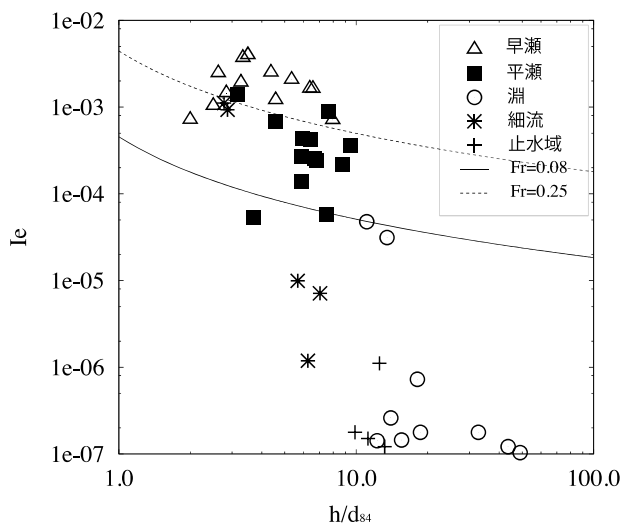


図-5 境界フルード数の推定

粗粒化の傾向があり、表面には藻類の付着が見られる。一方、淵や止水域は水深が深く流速はほとんど無い。淵の河床材料は砂礫質で死滅した藻類が多く付着しており、止水域では細泥が厚く堆積し、平水時はほぼ主流から隔離された環境にある。細流の流速は平瀬同等で 0.5m/s 程度、底質には細粒土砂を多く含み、湧水箇所も多く見られる。

2. 4 ハビタット区分の妥当性検証

野上ら¹⁾の研究では、Fr は水深と河床材料の粒径 (h/d_{84}) 及び水面勾配 (i_w) によって規定され、この Fr から河川構造を定量的に区分できることが示されている。ここでは、この手法に倣い、視覚的に判断されたハビタット区分の妥当性を物理的な側面から検証する。

急流河川であることを考慮し、河床抵抗には(1)式

で表される Hey の式を用い、実測の物理量 h 、 d_{84} 、 i_w を(2)式へと代入することで、勾配等の地形特性を考慮した Fr_2 を求める。なお、下式の i_e は i_w で代用する。

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = 5.75 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \quad (1)$$

$$Fr_2 = \frac{\sqrt{i_e}}{\sqrt{C_f}} = \sqrt{i_e} \left[5.75 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \right] \quad (2)$$

ここで C_f : 河床摩擦係数である。

次に、この Fr_2 を、実測の水深・流速から求めた Fr_1 に適合させるため、最小自乗法を用いて係数を調整する。調整式を(3)式に、Fr の適合状況を図-4 に示す。図から、両者は高い適合性を持つことがわかる。

$$Fr_2 = \sqrt{i_e} \left[7.45 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \right] \quad (3)$$

図-5 は、調査プロット 48 箇所をそれぞれプロットしたもので、点線と実線が、(3)式を用いて推定した瀬淵の境界 Fr である。図から、当該調査区間では、早瀬と平瀬は $Fr=0.25$ 、平瀬と淵は $Fr=0.08$ 付近にハビタットの境界があるものと判断できる。

図-6 は、この結果を一般的な水深-流速図で示したものであるが、この図からも、現地視覚的に判断された瀬淵等のハビタット区分は概ね妥当であると言える。

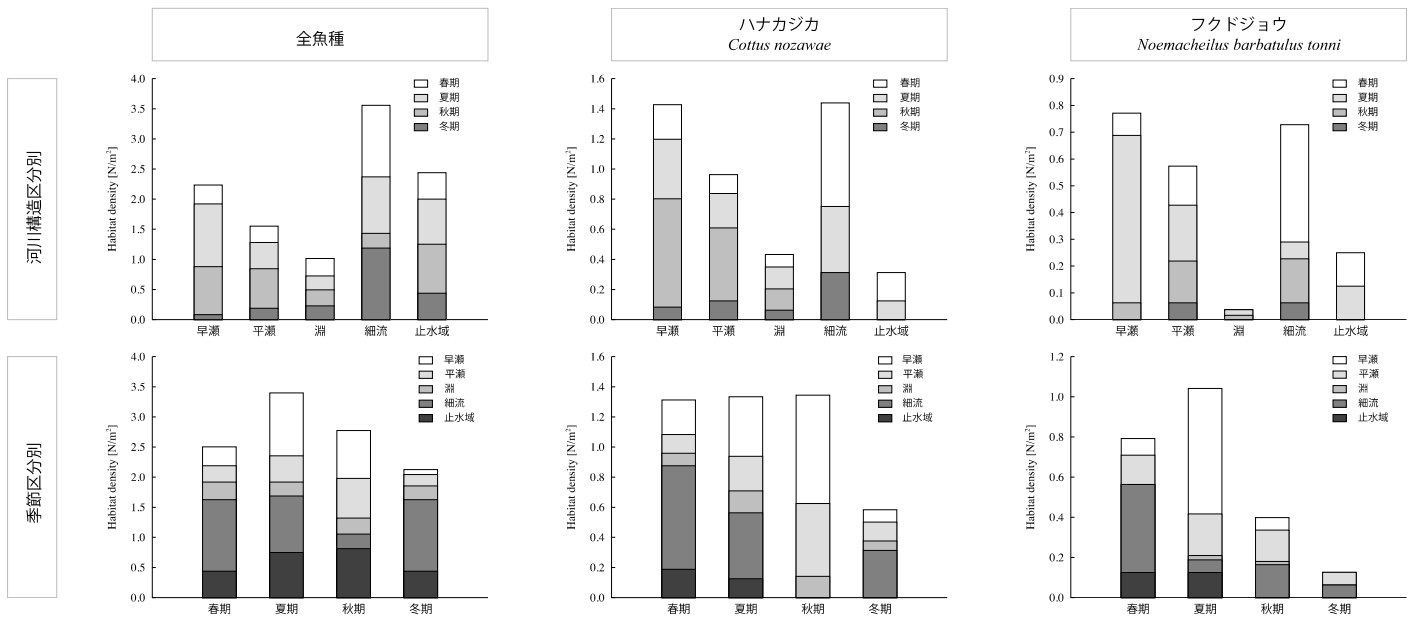


図-7 河川構造・季節別生息密度

3. 現地調査結果

3. 1 調査結果 (魚類)

魚類調査は、季節毎に計4回、全48箇所で行われ、計8種、353個体(春期:68, 夏期:109, 秋期:126, 冬期:50)が確認された。

このうち、全捕獲数の約85%が底生魚(ハナカジカ、フクドジョウ、スナヤツメ、カワヤツメ)で占められ、遊泳魚(ヤマメ、ニジマス、ウグイ、イバラトミヨ)は、水制工周辺の淵や止水域などでわずかに捕獲される程度であった。底生魚のうち、最も捕獲数が多いハナカジカは、全捕獲数の約50%(185個体)を占めており、次に優占するフクドジョウと合わせると、全体の約75%がこの2種によって占められることとなる。

本調査で底生魚の捕獲数の割合が非常に高かった要因として、まず、礫床河川である札内川は、礫間を生息場とする底生魚の生息に適した河川環境を有しており、元来、遊泳魚に比べて底生魚の生息数自体が多いことが挙げられる。また、本調査は作業工程上、調査区画を網で包囲するのに一定の時間を要するため、遊泳力の高い魚種の捕獲には適さない手法であることも要因の一つとして挙げられる。

ここで、特に優占率が高かったハナカジカ、フクドジョウの底生魚2種に関して、物理場(ハビタット)に対する選好性の違いと、生息場の季節的な変化を検証する。

図-7は、上段が河川構造区分、下段が各季節に対する捕獲数(生息密度)の頻度分布を示している。上段のグラフから明らかのように、ハナカジカ・フクドジョウのみならず、全魚種の累計値でも、淵<平瀬<早瀬の順に生息密度は上昇傾向を示しており、物理場に対する明瞭な選好性が認められる。

また、細流に関しては、通年的に生息密度が高く、特に春期・冬期は、その割合が大きく増加している。

下段中央のグラフから、ハナカジカの季節的な生息場の変化をみると、春期は細流を主な生息場とし、夏期~秋期にかけて、早瀬・平瀬へと徐々に生息場を変化させていることがわかる。これは、水温の低い厳冬期は主流以外を生息場とし、春先、水温の上昇とともに産卵・繁殖・採餌活動を活性化させ、河道内全域へと移動・分散する生態を持つためであると考えられる。

3. 2 体長組成分析

次に、ハナカジカの体長組成を季節毎に分析し、年齢群の遷移過程から成長曲線を求める。

一般的に、魚種の体長は、経年的な増加傾向を示すが、1世代の個体数は自然淘汰の影響によって徐々に減少する。体長組成の季節的な変化を追い、それが複数モードの年齢群を構成しながら季節的に増加傾向に遷移している場合、それが各年に孵化した年齢群であると言える。

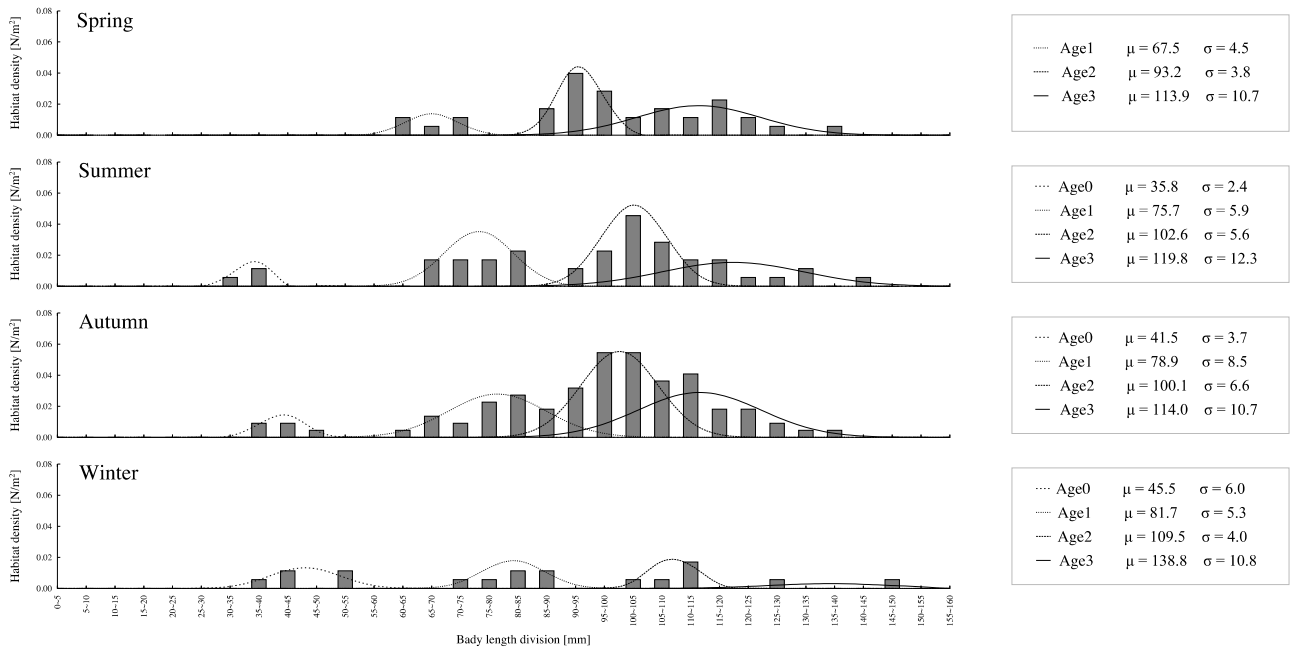


図-8 ハナカジカの体長組成（年齢群の遷移）

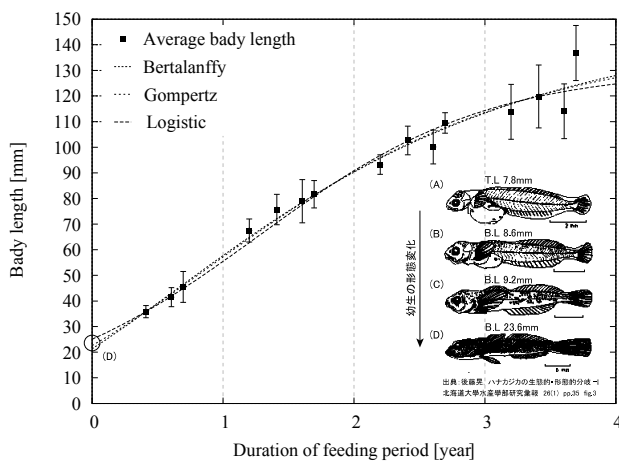


図-9 ハナカジカの成長曲線

Hasselblad 法を用いて季節毎の体長組成を分析した結果を図-9に示す。正規分布の形で現れている複数のモードは季節的な増加傾向を示しており、これがハナカジカの年齢群を示すものと考えられる。体長組成は概ね 3~4 つのモードで構成されていることから（図中 Age0~3）、ハナカジカの寿命は 3~4 年程度であることが類推される。

ここで、春期調査の際、Age0 群が確認されなかった理由について補足する。一般的にハナカジカの孵化時期は 4~5 月頃であるとされており、6 月の春期調査時点では、当該年に孵化した仔魚や稚魚も実際は河道内に多く生息していたものと考えられる、し

かし、孵化後 2~3 ヶ月程度では体長は 2~3cm 程度と小さく、調査の網目を通過するなどし、今回の調査では捕獲できなかったものと考えられる。

3.3 成長曲線の推定

図-8 に示す各年齢群の平均体長 μ と標準偏差 σ を用いてハナカジカの成長曲線を推定する。

分析には水産資源の推定に用いられる以下の 3 式を用いた。(4)式は Bertalanffy 曲線、(5)式は Gompertz 曲線、さらに(6)式は Logistic 曲線である。

$$L_t = L_\infty(1 - e^{-K(t-t_0)}) \quad (4)$$

$$L_t = L_\infty(e^{-ce^{-Kt}}) \quad (5)$$

$$L_t = \frac{L_\infty}{(1 + e^{-b(t-c)})} \quad (6)$$

ここで、 L_∞ : 最大体長、 K : 成長係数である。

図-9 に示す点群は、体長組成分析から得られた平均体長と標準偏差をもとに、ハナカジカの各成長段階をプロットしたもので、曲線群は、(4)~(6)式を用いた成長曲線の解析結果である。3 式の結果には大きな違いは無く、概ね点群を網羅する曲線が描かれる。この結果から、ハナカジカの平均的な個体の成長過程は（雌雄差は考慮しない）、まず、孵化後 1 年で体長 5cm 程度の稚魚にまで成長し、その後、2~3 年の期間を経て体長 10cm 以上の成魚となり、繁殖・産卵を終えた後、死滅するものと推察される。

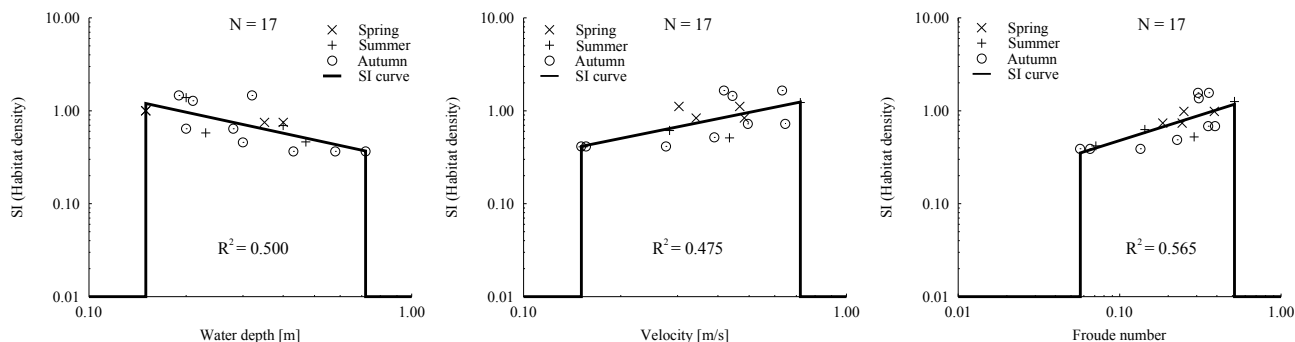


図-10 ハナカジカの選好曲線

3. 4 選好度解析

魚類調査の結果から、ハナカジカやフクドジョウが物理場に対して明瞭な選好性を有することが示唆された。次は、水生生物の物理場に対する選好度解析を行い、解析モデルに供する有効な指標について検討を行う。

選好度解析では、現地調査から得られた生物量(各魚種の生息密度)と、物理量(水深、流速)に関する単相関・単回帰分析を行い、高い相関を示す変数の組合せを抽出するとともに、得られた回帰式から第3種適性曲線を作成する。

解析の結果、ハナカジカの生息密度と水深、流速の間には強い相関が認められ、特にフルード数や水深径径比などの無次元量に対してはより高い相関を示すことがわかった。回帰分析から得られた選好曲線を図-10に示す。図から、水深に対しては負の相関を示し、流速・フルード数に対しては正の相関を示すなど、早瀬や平瀬のような環境を選好するハナカジカの生態的特性が現れている。

本研究では、物理場に対して高い選好性を有するハナカジカを指標種とし、生態系評価を行うこととする。

指標種の選定理由としては、選好曲線の高い相関性に加え、捕獲数に対する優占率が高く統計的に有利であることや、水生生物の中でも上位種に位置すること、さらに、礫間を生息場としており、礫河原を特徴とした札内川の河川環境を評価する上で、非常に重要な種であることなどが挙げられる。

4. ダム放流を対象とした河川生態系評価

4. 1 解析モデル

本研究では、水理河床変動量の解析に、iRIC Nays2D ver4.0³⁾を用いた。本モデルの詳細について

は文献⁴⁾を参照されたい。また解析では、水理河床変動解析にPHABSIMの手法を組合せ、図-10に示す選好曲線から、合成適正值(CSI: Composite Suitability Index)の空間分布と、重み付き利用可能面積(WUA: Weighted Usable Area)の時間変化を算出し、ダム放流前後を対象としたハナカジカの生息環境改善効果を定量的に評価する。

解析結果はWUAで比較し、水深・流速を用いた従来の評価手法と、無次元量(フルード数)を用いた今回の手法とを比較検証する。なお、WUAは計算区間全体(調査区間L=1km、B=0.4km)のCSIを累計したもので、それぞれ次式により算出される。

$$CSI1_i = SI(h_i) \cdot SI(v_i) \quad (7)$$

$$CSI2_i = SI(Fr_i) \quad (8)$$

$$WUA1 = \sum_{i=1}^N CSI1_i \cdot a(i) \quad (9)$$

$$WUA2 = \sum_{i=1}^N CSI2_i \cdot a(i) \quad (10)$$

4. 2 計算条件

解析区間は、現地調査区間(図-11)と同様とし、初期河床形状には、図-12に示す2011年の測量結果を用いる。ダム放流時の流量ハイドロは、調査区間の観測水位をもとに、ピーク流量を逐次変化させたH-Q式を求め、計算水位が観測値に最も漸近した際の流量ハイドロを採用した。

水理解析の結果、ダム地点のピーク流量 $Q=112\text{m}^3/\text{s}$ に対し、調査区間では、ピーク時 $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流れがあったものと推定された(図-13上段)。

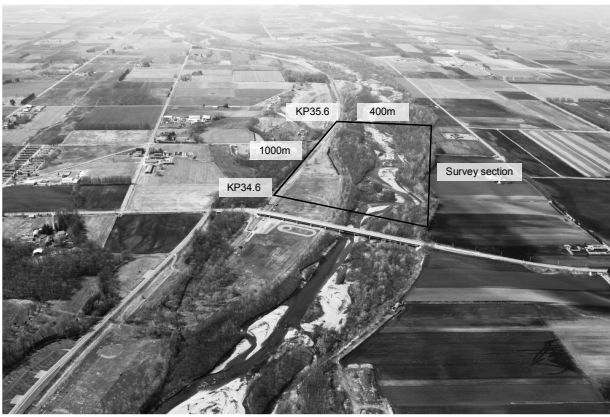


図-11 解析対象区間 (KP34.6~35.6)

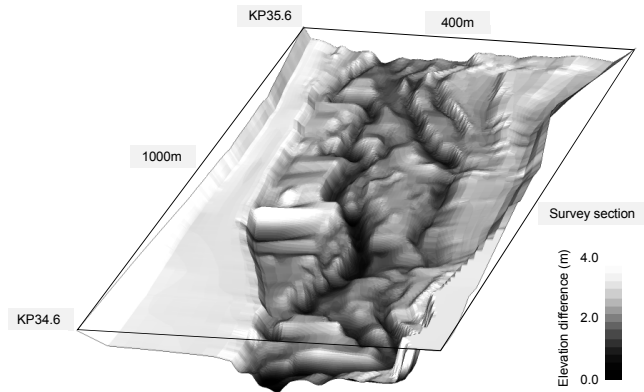


図-12 初期河床形状 (2011年11月測量)

4.3 解析結果

河床変動解析の結果、今回のダム放流による河道変化は、主に平水時の流路内における湾曲部内岸側の堆積と外岸側の河床低下が進行し、現況流路沿いに水みちが明瞭になっていくものであった。ただし、流量規模が小さく、河道変化はかなり限定的であったものと推察される。解析上も大きな河道変化は生じていないため、詳細についてはここでは省略する。

ダム放流前後の河川環境を(7)・(8)式で示す2種類の指標を用いて評価した結果を図-13に示す。

両結果を比較すると、WUA1は時間的な振動が大きいのに対して、WUA2は比較的安定した解析結果が得られている。これは、CSIを算定する際の式形の違いによるもので、水深・流速のSIの積で導かれるCSIは、水深・流速がともに選好曲線で評価できる範囲内であれば値を持ち得ず、フルード数から直接算定されるCSIに比べ、評価できる範囲がかなり限定されるためである。このことは、フルード数を用いた評価方法が、従来の水深・流速の積を用いたCSIに比べ、解析上優位である点の一つと言える。

また、出水前後のWUA2を、平水流量時(Q=10m³/s)で比較すると、計算領域全体に占める利用可能面積の割合は7.33%から8.47%へと約1%増加し、通水初期との比較では約15%の増加が認められた。このことは、今回のダム放流がハナカジカの生息場に対して一定の環境改善効果を持つことを示唆する結果と言える。

5. まとめ

本研究では、現地調査結果をもとに水生生物の生息状況及びその生態的特性を把握するとともに、選好度解析により無次元量を用いた指標を作成し、当該ダム放流前後を対象とした河川生態系の評価を行

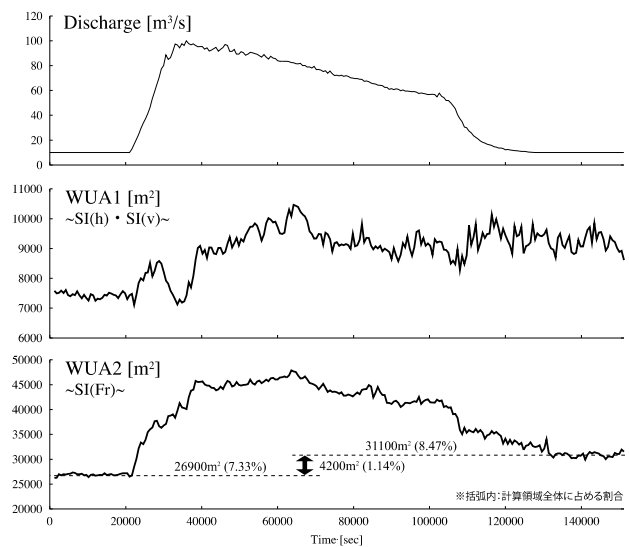


図-13 2012年ダム放流時の流量及びWUAの時間変化

った。その結果、フルード数を指標した場合、従来の手法に比べて様々な点で解析上優位であることが示された。また、ダム放流前後の河川環境をWUAで比較すると、約15%の利用可能面積の増加が認められ、ダム放流が一定の環境改善効果を持つことが示唆された。

参考文献

- 1) 野上毅, 渡邊康玄, 中津川誠: 急流河川における河床地形の定量的区分, 水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 2) 後藤晃: ハナカジカ *Cottus nozawae* Snyder の生態的・形態的分岐 -I.:産卵習性及び初期発育過程, 北海道大学水産学部研究彙報, 26(1):31-37, 1975.
- 3) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 4) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集, 第47巻, 2003.

A STUDY ON DESIGN TECHNIQUE OF RIVER CHANNEL THAT CAPACITATE TO SUSTAINED CONSERVATION OF HYDRAULIC DIVERSITY IN THE RIVER FOR SNOW COVERAGE AND COLD REGION

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

NAGATA Tomonori

AKAHORI Ryouzuke

Abstract : In the Satsunai River, many groins have been built as countermeasures of stabilizing the water channels for the purpose of flood control. But recently, gravel riverbeds are rapidly disappearing because of the said countermeasures. Stabilization of channels might simplify the hydraulic characteristics and deteriorate habitat conditions of water species, therefore immediate countermeasures are being required. In this study, I investigate quantity of creature and physics. In addition, I analyze findings and make the index that used a quantity of no dimension. Furthermore, I apply this index in an ecosystem evaluation model and evaluate the influence that dam discharge gave to river environment from a respect of habitation environment.

Key words : Satsunai River, Dam Discharge, Ecosystem Evaluation Model